

# 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用\*

张恒嘉 李晶

(甘肃农业大学工学院, 兰州 730070)

**摘要:** 通过大田试验研究了调亏灌溉对绿洲膜下滴灌马铃薯各项光合生理指标、产量和水分利用的影响。结果表明:不同生育期水分调亏均可引起马铃薯叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低,复水后光合速率变化不大,蒸腾速率和气孔导度则均有所增大。块茎形成期轻度调亏马铃薯产量不会降低,而块茎形成期中度调亏、块茎膨大期轻度和中度调亏马铃薯产量则显著( $p < 0.05$ )降低。马铃薯不同生育阶段耗水量受水分调亏影响较大,调亏程度越大耗水量减少越显著,所有水分调亏马铃薯全生育期耗水量均显著低于充分供水。块茎形成期水分轻度调亏马铃薯水分利用效率最高,比块茎膨大期中度调亏、淀粉积累期轻度调亏和全生育期充分供水分别提高36.2%、32.4%和14.2%。因此,膜下滴灌调亏可降低马铃薯光合速率、蒸腾速率、气孔导度和耗水量,促进水分利用效率提高,且块茎形成期轻度调亏不会降低马铃薯产量。

**关键词:** 绿洲马铃薯 膜下滴灌 水分调亏 光合生理特性 水分利用效率 产量

**中图分类号:** S532; Q945.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0143-09

## Photosynthetic Physiological Characteristics and Water Use of Potato with Mulched Drip Irrigation under Water Deficit in Oasis Region

Zhang Hengjia Li Jing

(School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to test the effect of mulched drip irrigation under water deficit regulation (WDR) on leaf photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), tuber yield and potato water use in oasis irrigation region. The results showed that  $P_n$ ,  $T_r$  and  $G_s$  were reduced by WDR during different potato growth stages. No obvious difference was found in  $P_n$  before and after re-watering of potato, but  $T_r$  and  $G_s$  were obviously improved. Potato yield was not decreased by low WDR during tuber initiation, but was significantly ( $p < 0.05$ ) decreased in the medium WDR plots during tuber initiation and low and medium WDR plots during tuber bulking. Periodic water consumption of potato was greatly affected by WDR, and the higher soil water deficit, the less potato periodic water consumption. In addition, the total water consumption throughout the whole growing season was significantly lower in all the WDR potatoes than that in full irrigation plots (CK). The highest water use efficiency (WUE) was maintained in low WDR potato during tuber initiation, significantly improved by 36.2%, 32.4% and 14.2% than that in medium WDR plots during tuber bulking, low WDR plots during potato starch accumulation and CK, respectively. Therefore, mulched drip irrigation under WDR may reduce  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ , and periodic and total water consumption of potato, but its WUE can be greatly improved. In addition, potato yield will not be reduced by mulched drip irrigation under low WDR during tuber initiation.

**Key words:** Oasis potato Mulched drip irrigation Water deficit Photosynthetic physiological characteristics Water use efficiency Yield

## 引言

马铃薯是世界上继小麦、水稻、玉米之后的第四大农作物<sup>[1]</sup>,也是对土壤水分和温度十分敏感的作物<sup>[2]</sup>。大量试验研究表明,亏缺灌溉不仅有利于提高马铃薯产量和产品品质<sup>[3-5]</sup>,对马铃薯需水量时空分布特征和耗水规律也有显著影响<sup>[6-7]</sup>。在甘肃河西地区,马铃薯已成为继小麦、大麦之后的第三大特色农作物,也是该区重要的粮食作物和经济作物。近年来,随着马铃薯加工业的兴起,该区原料薯需求量猛增,种植面积迅速扩大。而地处西北干旱内陆河流域的河西绿洲灌区虽然光热资源十分丰富,年太阳总辐射量 5 800 ~ 6 400 MJ/m<sup>2</sup>,年日照总时数 2 800 ~ 3 300 h,但该区降水稀少,年降水量仅为 35 ~ 200 mm,属典型的干旱区<sup>[8]</sup>,水分是该区植物生长的主要限制因子。在这种情况下,推广应用具有节水增产调质优势的膜下滴灌技术可在一定程度上缓解水资源紧缺对作物种植的制约。

膜下滴灌技术将地膜覆盖保墒技术与滴灌技术相结合,具有增温保墒、高效节水、增产调质等优点。目前,膜下滴灌技术在甜椒<sup>[9]</sup>、葡萄<sup>[10]</sup>、棉花<sup>[11]</sup>和玉米<sup>[12]</sup>等作物上已有大量应用研究,在马铃薯种植方面亦有研究<sup>[13-14]</sup>。但有关膜下滴灌条件下马铃薯调亏灌溉的试验研究并不多见,而对膜下滴灌马铃薯水分调亏的光合生理特性、产量及水分利用的研究相对更少。本文通过河西内陆干旱区马铃薯大田试验,研究分析膜下滴灌调亏对马铃薯叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度等光合生理特性和作物产量及其构成要素、耗水特征、水分利用效率、灌溉水利用效率及土壤含水率的影响,以期揭示该区马铃薯膜下滴灌调亏的高效节水增产机理提供理论依据和技术支撑。

## 1 研究内容与研究方法

### 1.1 试区概况

试验于 2012 年 4 ~ 10 月在甘肃省张掖市水务局国家重点灌溉试验站进行。该站位于张掖市西北约 20 km 处,海拔 1 482.7 m,100°26'E,38°56'N。该试验区具有降雨量小(年均 140 mm)、蒸发量大(大于 2 000 mm)、昼夜温差大等特点,属于典型的大陆性干旱气候。试区地势平坦,地下水埋深大于 20 m,土质为中壤土,土壤肥力中等,pH 值 8.4,土壤容重密度 1.46 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量为 22.8% (质量含水率),0 ~ 20 cm 耕层土壤有机质含量 1.365%,速效磷 13.4 mg/kg,碱解氮 61.8 mg/kg,速效钾 190.4 mg/kg。

### 1.2 试验设计及方法

供试材料为青薯 168,由青海省农科院作物所选育,属晚熟菜用型和淀粉加工兼用型品种。马铃薯于 2012 年 4 月 20 日播种,10 月 19 日收获,全生育期历时 182 d,生育期内总降水量 140.8 mm。试验依不同水分调亏水平和调亏生育期设 5 个处理(WD1 ~ WD5),1 个对照(CK),分别在马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期 3 个生育阶段进行水分调亏(表 1)。表 1 中数据为相对含水率。马铃薯有较强的耐旱性,在南方地区,马铃薯相对含水率 50% ~ 60% 已属供水充足,70% 已属供水稍过量<sup>[15]</sup>。考虑到本研究区地处干旱的西北内陆河流域,降雨量小而蒸发量极大,结合当地农业生产实际,相对含水率 65% ~ 75% 为充分供水,55% ~ 65% 为轻度水分亏缺,45% ~ 55% 为中度水分亏缺,水分控制上、下限范围与区域实际较为吻合<sup>[16]</sup>。

表 1 试验设计方案

Tab. 1 Experimental design					%
处理	苗期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	
WD1	65 ~ 75	55 ~ 65	65 ~ 75	65 ~ 75	
WD2	65 ~ 75	65 ~ 75	55 ~ 65	65 ~ 75	
WD3	65 ~ 75	65 ~ 75	65 ~ 75	55 ~ 65	
WD4	65 ~ 75	45 ~ 55	65 ~ 75	65 ~ 75	
WD5	65 ~ 75	65 ~ 75	45 ~ 55	65 ~ 75	
CK	65 ~ 75	65 ~ 75	65 ~ 75	65 ~ 75	

采用起垄覆膜与膜下滴灌相结合的栽培方式,单垄双行种植,垄宽 80 cm,垄高 20 cm,垄距 40 cm,株距 20 cm。垄中间铺设滴灌带,株距为 20 cm。试验为单因素随机区组设计,3 次重复,小区面积为 36 m<sup>2</sup> (10 m × 3.6 m)。每个小区为一个滴灌支管控制单位,支管单元入口安装有闸阀和水表,在每垄上安装一条薄壁式滴灌带(新疆天业集团有限公司生产)并覆一层聚乙烯薄膜(宽 70 cm)。滴灌带为迷宫式流道,内径 16 mm,滴孔间距 20 cm,抗堵塞能力强。根据经验,本试验土壤湿润比取 54%。

播种前试验地均匀撒施氮肥和磷二铵各 80 kg/hm<sup>2</sup> 作为基肥,块茎形成期追施氮肥 20 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 测定项目及方法

(1)产量:马铃薯成熟期按小区单独收获计产,分别记录各小区薯块产量和商品薯产量。

(2)土壤水分:用土钻取样干燥法测定土壤含水率。马铃薯根系主要分布在 0 ~ 40 cm 范围内<sup>[17]</sup>,因此根据试区实际情况,每个小区随机选取一垄在距滴灌带进水口 30 ~ 50 cm 处和距滴灌带末尾 30 ~ 50 cm 处取土。播种前(4 月 19 日)、收获后

(10月19日)取土深度为1 m,分6个剖面梯度测定:0~10、10~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm。生育期内每隔7~10 d取土1次,测定深度为60 cm,按0~10、10~20、20~40和40~60 cm分4个剖面梯度取土,灌水和降雨后加测。当土壤含水率降至表1控制下限时,立即进行灌水,灌水量计算公式为<sup>[18]</sup>

$$m = 10\rho_b H(\beta_i - \beta_j) \quad (1)$$

式中  $m$ ——灌水量,mm

$\rho_b$ ——计划湿润层土壤容积密度,g/cm<sup>3</sup>

$H$ ——计划湿润层深度,取60 cm

$\beta_i$ ——目标含水率(田间持水量乘以设计目标相对含水率上限)

$\beta_j$ ——灌前土壤含水率

水表控制灌水量,以保证各处理3个重复灌水量相同。所得灌水量换算公式为

$$I_R = (667d / 1000) \times 15 = 10.005d \quad (2)$$

式中  $I_R$ ——单位面积灌水量,m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>

$d$ ——灌水层厚度,mm

另外,降雨量换算公式为

$$P_1 = (667P_0 / 1000) \times 15 = 10.005P_0 \quad (3)$$

式中  $P_1$ ——单位面积降雨量,m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>

$P_0$ ——降雨量,mm

全生育期耗水量换算公式为

$$W = (667W_0 / 1000) \times 15 = 10.005W_0 \quad (4)$$

式中  $W$ ——单位面积全生育期耗水量,m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>

$W_0$ ——全生育期耗水量,mm

(3)光合生理特性:在块茎形成期第28天左右(7月19日或7月20日)和块茎膨大期第30天左右(8月28日至9月1日)晴朗天气从7:00至19:00每隔2 h测定一次马铃薯光合生理特性。采用ECA-PB0402型便携式光合测定仪(北京益康农科技发展有限公司生产),选取马铃薯完全展开叶的顶叶进行田间活体测定。测定指标有叶片净光合速率( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),蒸腾速率( $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),气孔导度( $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )等。每小区取样3株,为减小时间误差,测定在15~20 min内完成并计算其平均值。

(4)马铃薯耗水量:采用水量平衡法<sup>[19]</sup>计算。

$$E_T = 10 \sum_{i=1}^n r_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K - C \quad (5)$$

式中  $E_T$ ——某生育阶段作物耗水量,mm

$i$ ——土层编号

$n$ ——土壤层次总数

$r_i$ ——第*i*层土壤干容积密度,g/cm<sup>3</sup>

$H_i$ ——第*i*层土层厚度,cm

$W_{i1}$ 、 $W_{i2}$ ——第*i*层土壤某时段始、末质量含水率,%

$M$ 、 $P$ ——某时段内灌水量、有效降雨量,mm

$K$ ——某时段内深层土壤水补给量,mm

$C$ ——某时段内排水量,为地表排水与下层排水之和,mm

试区地下水埋深大于20 m,故*K*值为零;试区属绿洲干旱区,灌水上限最大为田间持水量的75%,不会产生向100 cm土层以下的深层渗漏,故*C*取值为零。

(5)水分利用效率为

$$R_{WUE} = Y/E_{Ta} \quad (6)$$

$$I_{WUE} = Y/I \quad (7)$$

式中  $R_{WUE}$ ——马铃薯全生育期水分利用效率,kg/m<sup>3</sup>

$I_{WUE}$ ——全生育期灌溉水利用效率,kg/m<sup>3</sup>

$Y$ ——马铃薯单位面积产量,kg/hm<sup>2</sup>

$E_{Ta}$ ——马铃薯全生育期实际单位面积耗水量,m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>

$I$ ——全生育期单位面积灌水量,m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>

## 1.4 数据处理

采用Microsoft Office Excel 2003处理试验数据并绘图,用SPSS 17.0进行统计分析,并用Duncan的SSR检验法进行差异显著性多重比较分析( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 膜下滴灌调亏对马铃薯叶片光合速率、蒸腾速率及气孔导度的影响

#### 2.1.1 光合速率

水分调亏对马铃薯块茎形成期和块茎膨大期叶片光合速率均有影响(图1)。不论是块茎形成期还是块茎膨大期水分调亏,马铃薯叶片光合速率均降低,且水分亏缺程度越高,光合速率降低幅度越大。没有水分亏缺时,块茎膨大期各处理日平均光合速率均高于块茎形成期(如WD3、CK)。在块茎形成期,受水分亏缺的影响,WD1和WD4处理光合速率分别比对照CK降低8.0%和8.5%,块茎膨大期处理WD2和WD5则显著( $p < 0.05$ )低于CK,分别低21.6%和27.0%。块茎膨大期复水后WD4处理光合速率上升不明显,而WD1处理则增加4.3%,但仍比CK( $2.43 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )低14.9%。

#### 2.1.2 蒸腾速率

水分调亏对马铃薯块茎形成期和块茎膨大期叶片蒸腾速率也有较大影响(图2)。随着水分调亏程度的增加,蒸腾速率呈下降趋势,块茎形成期表现尤为突出,其日平均蒸腾速率明显大于块茎膨大期。块茎形成期WD1和WD4处理蒸腾速率分别为

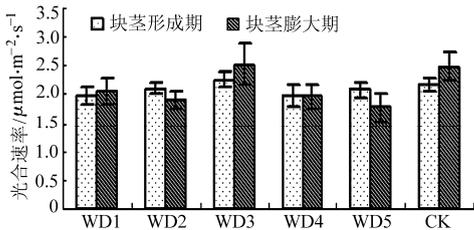


图1 水分调亏对马铃薯叶片光合速率的影响

Fig. 1 Effect of water deficit on leaf photosynthetic rate

11.43 mmol/(m<sup>2</sup>·s) 和 11.28 mmol/(m<sup>2</sup>·s), 显著 ( $p < 0.05$ ) 比对照 CK (16.15 mmol/(m<sup>2</sup>·s)) 低分别为 29.2% 和 30.1%。块茎膨大期保持充足供水的处理 WD1、WD4 处理蒸腾速率比块茎形成期明显增高, WD4 增幅则为 WD1 的 6.6 倍, 而此期分别进行轻度和中度水分调亏的 WD2、WD5 处理蒸腾速率均显著低于 CK, 分别低 13.5% 和 27.6%, 且中度调亏的 WD5 处理 Tr 亦低于轻度调亏的 WD2 处理。除 WD1 和 WD4 外, 其他处理及对照块茎膨大期蒸腾速率日均值均小于块茎形成期。

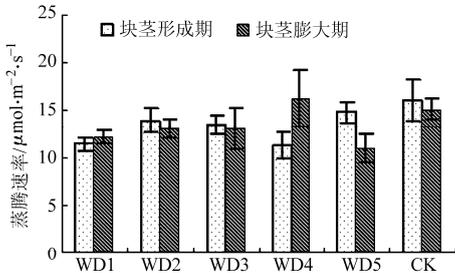


图2 水分调亏对马铃薯叶片蒸腾速率的影响

Fig. 2 Effect of water deficit on leaf transpiration rate

### 2.1.3 气孔导度

气孔是植物叶片与外界气体进行交换的主要通道, 而气孔导度则决定着叶片光合作用和蒸腾作用的强弱。本研究块茎形成期中度水分调亏的 WD4 处理和块茎膨大期轻度和中度调亏的 WD2、WD5 处理本期气孔导度均显著 ( $p < 0.05$ ) 小于同期对照 CK 的 17.8% 和 20.3%、27.2% (图 3), 块茎形成期轻度调亏的 WD1 处理气孔导度与同期对照差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 但仍比 CK 小 8.0%, 说明水分调亏会诱导气孔导度变小, 且水分亏缺程度越大, 气孔导度越小。块茎形成期轻度调亏的 WD1 处理本期气孔导度 (140.8 mmol/(m<sup>2</sup>·s)) 比本期未调亏的 WD2 大 10.3%, 但与本期未调亏的 WD3 处理间不存在显著差异。块茎膨大期中度水分调亏的 WD5 处理本期气孔导度显著小于 WD3、WD4、CK, 分别小 29.5%、28.8%、27.2%, 但与 WD1、WD2 差异不显著, 而此期轻度调亏的 WD2 处理本期气孔导度显著小于 WD3、WD4、CK, 分别小 22.8%、22.0%、20.3%, 但与 WD1 无显著差异。此外, 块茎膨大期

除 WD5 处理气孔导度略小于块茎形成期 4.6% 外, 其他处理及对照 (WD1、WD2、WD3、WD4、CK) 气孔导度均比块茎形成期显著增大, 分别大 12.2%、23.9%、47.8%、61.2%、29.7%。

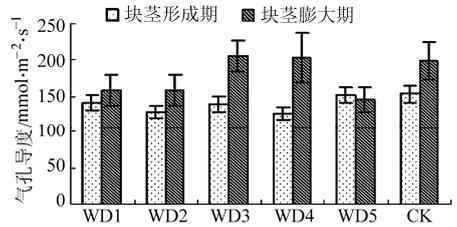


图3 水分调亏对马铃薯叶片气孔导度的影响

Fig. 3 Effect of water deficit on leaf stomatal conductance

## 2.2 膜下滴灌调亏对马铃薯产量及其构成要素的影响

### 2.2.1 薯块产量及商品薯产量

由表 2 可知, 马铃薯薯块产量以全生育期充分供水的对照 CK 最高 (31 250 kg/hm<sup>2</sup>), 以块茎膨大期中度调亏的 WD5 最低 (18 810 kg/hm<sup>2</sup>)。除块茎形成期轻度水分调亏的 WD1 处理与对照 CK 间薯块产量差异不显著 ( $p > 0.05$ ) 外, 其他 4 个调亏处理薯块产量均显著低于 CK ( $p < 0.05$ ), 分别低 25.4%、28.2%、22.9%、39.8%。各处理及对照薯块产量高低顺序为: CK、WD1、WD4、WD2、WD3、WD5。块茎形成期轻度水分调亏的 WD1 处理薯块产量比同期中度调亏的 WD4、块茎膨大期和淀粉积累期轻度调亏的 WD2 和 WD3 均显著提高, 分别高 13.2%、16.4% 和 21.5%, 而块茎膨大期中度调亏的 WD5 薯块产量降低幅度最大, 与对照 CK 相比减产 39.8%, 与同期轻度水分调亏的 WD2 相比减产 19.7%。处理 WD2 和 WD5 因在块茎膨大期轻度和中度水分调亏而商品薯产量比 CK 显著 ( $p < 0.05$ ) 降低, 分别低 30.8% 和 42.1%, 但 WD1、WD3、WD4 处理与 CK 间及此 3 个水分调亏处理间商品薯产量均无显著差异。

### 2.2.2 产量构成要素

膜下滴灌调亏对马铃薯单株结薯数、单株薯质量均有显著影响, 如表 2 所示 ( $p < 0.05$ ), 但对薯块纵径、横径影响不显著 ( $p > 0.05$ )。块茎形成期轻度水分调亏的 WD1 处理单株结薯数显著少于此期充分供水而块茎膨大期轻度调亏的 WD2 39.2%, 但与其他处理及对照间均不存在显著差异。块茎膨大期轻度水分调亏的 WD2 单株结薯数为 3.11 个, 分别比对照 CK、WD5、WD1 增加 16.5%、11.9%、64.6%, 且 WD1、WD3、WD4 及 WD3、WD4、WD5、CK 间均不存在显著差异。WD1 处理因在块茎形成期经受轻度水分亏缺, 其单株结薯数比 CK 减少

29.2%, 而 WD4 在块茎形成期经受中度水分亏缺, 但单株结薯数比 CK 仅减少 12.7%, 说明块茎形成

期水分调亏可降低马铃薯单株结薯数, 中度调亏对单株结薯数的影响反而要小于轻度调亏。

表 2 不同处理马铃薯产量及其构成要素

Tab. 2 Tuber yield and its components of potato subjected to various treatments

处理	单株结薯数	单株薯质量/g	纵径/cm	横径/cm	薯块产量/kg·hm <sup>-2</sup>	商品薯产量/kg·hm <sup>-2</sup>
WD1	1.89 <sup>c</sup>	375.7 <sup>b</sup>	8.6 <sup>a</sup>	6.2 <sup>a</sup>	27 275 <sup>ab</sup>	25 343 <sup>ab</sup>
WD2	3.11 <sup>a</sup>	322.2 <sup>bc</sup>	7.9 <sup>a</sup>	5.7 <sup>a</sup>	23 425 <sup>b</sup>	20 665 <sup>b</sup>
WD3	2.44 <sup>bc</sup>	356.4 <sup>b</sup>	8.7 <sup>a</sup>	6.3 <sup>a</sup>	22 450 <sup>b</sup>	21 407 <sup>ab</sup>
WD4	2.33 <sup>bc</sup>	315.2 <sup>bc</sup>	8.3 <sup>a</sup>	6.0 <sup>a</sup>	24 085 <sup>b</sup>	23 167 <sup>ab</sup>
WD5	2.78 <sup>b</sup>	284.7 <sup>c</sup>	7.9 <sup>a</sup>	6.0 <sup>a</sup>	18 810 <sup>c</sup>	17 276 <sup>b</sup>
CK	2.67 <sup>b</sup>	469.4 <sup>a</sup>	9.0 <sup>a</sup>	6.6 <sup>a</sup>	31 250 <sup>a</sup>	29 842 <sup>a</sup>

注: 表中同列数据上标字母不同表示差异显著( $p < 0.05$ ), 下同。

所有水分调亏处理单株薯质量均显著( $p < 0.05$ ) 低于对照 CK, 且 WD1 和 WD3 显著高于 WD5, 但调亏处理 WD1、WD2、WD3、WD4 间及 WD2、WD4 与 WD5 间单株薯质量差异不显著( $p > 0.05$ )。WD1 处理单株薯质量比对照 CK 降低 20.0%, WD2、WD5 虽然单株结薯数较多, 但由于受块茎膨大期水分亏缺的影响, 其单株薯质量比 CK 降低 31.4% 和 39.3%, WD3 和 WD4 处理也比 CK 降低 24.1% 和 32.9%。WD1、WD4 处理由于受块茎形成期水分亏缺的影响, 单株结薯数较少, 但因后期的复水补偿效应, 单株薯质量比 WD5 分别增加了 32.0% 和 10.7%, WD1 增幅达显著水平, 而 WD3 单株薯质量则比 WD5 增加 25.2%。此外, 各水分调亏处理及对照间薯块纵径和横径差异均不显著。

## 2.3 膜下滴灌调亏对马铃薯耗水量的影响

### 2.3.1 阶段耗水特征

阶段耗水量反映了马铃薯不同生育阶段的耗水特征(表 3), 这与马铃薯各生育期内的气候状况及生长特性有关。总体来看, 膜下滴灌调亏马铃薯各生育阶段耗水量由大到小依次为块茎形成期、块茎膨大期、幼苗期、淀粉积累期, 大致呈现出先增大、后减小、再减小的变化趋势。马铃薯幼苗期植株叶面积弱小, 各处理耗水量占总耗水量的 20.0% ~ 23.9% (质量分数, 下同)。块茎形成期地上植株茎叶生长和地下块茎形成同时进行, 这一阶段耗水量最大, 占整个生育期总耗水量的 24.6% ~ 45.5%。块茎膨大期以块茎生长为主, 耗水量占总耗水量的 10.4% ~ 35.1%。进入淀粉积累期, 马铃薯叶片脱落, 块茎生长速度减缓, 耗水量也进一步减少, 占总耗水量的 13.1% ~ 20.3%。

各水分调亏处理在调亏生育期内耗水量均显著( $p < 0.05$ ) 减少(表 3)。由于幼苗期作物充分供水, 所有处理及对照间耗水量无显著差异( $p > 0.05$ )。在块茎形成期, 水分调亏处理 WD1、WD4 与 CK 间

表 3 马铃薯不同生育阶段耗水量

Tab. 3 Water consumption in various potato growth stages

处理	potato growth stages				mm
	苗期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	
WD1	92.11 <sup>a</sup>	105.52 <sup>c</sup>	142.00 <sup>a</sup>	70.02 <sup>a</sup>	
WD2	74.96 <sup>a</sup>	156.85 <sup>b</sup>	59.78 <sup>b</sup>	74.63 <sup>a</sup>	
WD3	90.39 <sup>a</sup>	169.65 <sup>ab</sup>	127.58 <sup>a</sup>	58.92 <sup>b</sup>	
WD4	79.85 <sup>a</sup>	92.13 <sup>c</sup>	131.18 <sup>a</sup>	70.12 <sup>a</sup>	
WD5	93.45 <sup>a</sup>	175.70 <sup>a</sup>	40.46 <sup>c</sup>	76.51 <sup>a</sup>	
CK	109.85 <sup>a</sup>	192.07 <sup>a</sup>	150.67 <sup>a</sup>	86.06 <sup>a</sup>	

耗水量差异显著, 分别比 CK 减少 45.0% 和 52.0%。在块茎膨大期, 复水后 WD1 和 WD4 处理耗水量比块茎形成期显著增加, 仅次于 CK, 但与 CK 间差异不显著, 而调亏处理 WD2、WD5 与 CK 间耗水量差异均达显著水平, 分别比 CK 显著减少 60.0% 和 73.0%。在淀粉积累期处理 WD2、WD5 耗水量明显增加, 仅次于 CK, 而此期经受轻度水分亏缺的 WD3 耗水量显著低于 CK, 达 31.5%。因此, 马铃薯各生育阶段耗水量受水分调亏影响较大, 水分调亏程度越大, 耗水量减少越显著。

### 2.3.2 全生育期耗水量

所有水分调亏处理马铃薯全生育期耗水量均显著( $p < 0.05$ ) 低于对照 CK (5 386.7 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>), 且以 WD2 全生育期耗水量最少 (3 662.1 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 表 4)。WD1 ~ WD5 5 个水分调亏处理全生育期耗水量比全生育期充分供水的对照 CK 显著减少, 减少达 20.6% ~ 47.1%。在水分调亏处理中, 全生育期耗水量以 WD3 最多, 高于其他 4 个调亏处理 9.0% ~ 21.9%, 但 WD1 与 WD5 间、WD5 与 WD2、WD4 间差异不显著( $p > 0.05$ )。

## 2.4 膜下滴灌调亏对马铃薯水分利用效率的影响

### 2.4.1 水分利用效率

马铃薯全生育期水分利用效率以 WD1 最高 (6.66 kg/m<sup>3</sup>), 以 WD5 最低 (4.89 kg/m<sup>3</sup>), 但所有

水分调亏处理与对照差异均未达显著水平 ( $p > 0.05$ , 表4)。块茎形成期轻度调亏的 WD1 处理水分利用效率比块茎膨大期中度调亏的 WD5 处理和淀粉积累期轻度调亏的 WD3 处理显著 ( $p < 0.05$ )

提高, 分别高 36.2% 和 32.4%, 而块茎形成期中度调亏的 WD4 处理分别比 WD5 和 WD3 提高 31.9%、28.2%, 块茎膨大期轻度调亏的 WD2 处理则提高 30.9%、27.2%。

表4 马铃薯全生育期水分利用状况

Tab.4 Water use of potato during whole crop growing seasons

处理	降雨量 / $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	全生育期灌水量 / $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	全生育期耗水量 / $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	水分利用效率 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	灌溉水利用效率 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
WD1	1 408	2 973	4 096.8 <sup>c</sup>	6.66 <sup>a</sup>	9.17 <sup>ab</sup>
WD2	1 408	2 473	3 662.1 <sup>d</sup>	6.40 <sup>a</sup>	9.47 <sup>a</sup>
WD3	1 408	3 212	4 465.4 <sup>b</sup>	5.03 <sup>b</sup>	6.99 <sup>c</sup>
WD4	1 408	2 613	3 732.8 <sup>d</sup>	6.45 <sup>a</sup>	9.27 <sup>ab</sup>
WD5	1 408	2 463	3 861.1 <sup>cd</sup>	4.89 <sup>b</sup>	7.64 <sup>bc</sup>
CK	1 408	3 730	5 386.7 <sup>a</sup>	5.83 <sup>ab</sup>	8.38 <sup>b</sup>

#### 2.4.2 灌溉水利用效率

淀粉积累期轻度水分调亏的 WD3 处理全生育期灌溉水利用效率最低 ( $6.99 \text{ kg/m}^3$ ), 比充分供水的对照 CK 低 16.6% ( $p < 0.05$ ), 亦比水分调亏处理 WD1、WD2、WD4 低 23.8%、26.2%、24.6%, 但与块茎膨大期中度调亏的 WD5 处理间差异不显著 ( $p > 0.05$ , 表4)。另外, 块茎膨大期轻度调亏的 WD2 处理灌溉水利用效率显著高于 WD5 和 CK, 分别为 24.0% 和 13.0%, 但与 WD1、WD4 间无显著差异。WD1、WD4、WD5、CK 之间灌溉水利用效率亦不存

在显著差异。

#### 2.5 膜下滴灌调亏对马铃薯土壤含水率的影响

土壤含水率作为诊断作物水分亏缺程度的重要指标, 受降雨、灌溉、作物蒸腾蒸发等因素的共同影响而发生变化。图4为马铃薯整个生育期内不同水分调亏处理 0~60 cm 土层土壤含水率变化过程。各处理土壤水分变化呈现不同的消长规律, 无供水或降雨时, 因马铃薯生理耗水及棵间蒸发等原因, 土壤含水率随播后日数呈线性下降趋势; 而供水或降雨后, 土壤含水率明显增高。

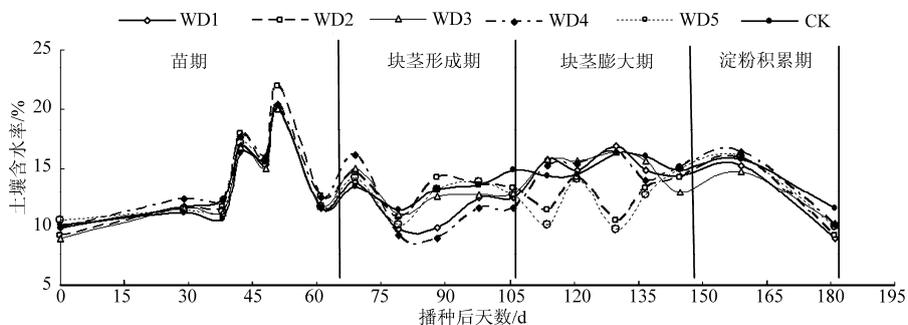


图4 马铃薯全生育期不同水分调亏处理土壤含水率变化

Fig.4 Soil moisture variation in potato field under different water deficit regulation

马铃薯幼苗前期降雨 44.1 mm、各处理灌水 60 mm, 0~60 cm 土层土壤含水率总体变化较为平缓一致。块茎形成期各处理及对照依次分别灌水 45.0、98.8、109.4、17.0、108.7 和 120.4 mm, 其中 WD4 灌水最少, 占该处理总灌水量的 9.2%; CK 灌水最多, 占 42.3%。块茎膨大期对 WD2、WD5 水分调亏灌水 2 次, 使其土壤含水率保持在设计水平。播种后 116 d (8 月 16 日) 之前 WD2、WD5、CK 总灌水量分别为 158.8、168.7、254.9 mm, 8 月 16 日又分别灌水 21.9、10.9、25.2 mm, 8 月 20 日 (第 120 天) 降雨 2.5 mm, 各处理及对照土壤含水率均呈现上升趋势, 当日 WD2、WD5、CK 土壤含水率分别为

16.2%、14.0%、14.4%, 比 8 月 13 日分别增加 42.4%、39.0%、0.6%。8 月 20 日以后, WD2、WD5 处理土壤水分含量降低, 至 8 月 29 日已下降 35.1%、30.2%。淀粉积累期马铃薯水分的需求量较小 (表3), 各处理灌水也较少, 其中 WD3 灌水 27.8 mm, 占该处理总灌水量 8.7%, 其他处理及对照均灌水 60.6 mm, 分别占总灌水量的 20.4%、24.5%、23.3%、24.6%、16.2%, 土壤含水率仍呈缓慢下降趋势。

### 3 讨论

在干旱农业区, 水分是作物生产的主要限制因

子, 获取较高的作物产量和水资源利用效率已成为人们追求的主要目标<sup>[20]</sup>。国内外大量研究证明, 滴灌技术, 尤其是膜下滴灌和水分调亏可获得较高的马铃薯产量和高水分利用效率, 对其产量构成要素也有重要影响<sup>[21~26]</sup>。因此, 探讨膜下滴灌调亏对马铃薯产量形成及水分利用的影响机理已成为当前研究的热点问题和重要发展方向。本研究表明, 块茎形成期作为马铃薯产量形成的重要时期, 保持土壤水分充足可提高单株块茎数, 然而此期马铃薯根系逐渐伸展扩张, 植株茎叶生长旺盛, 在这一时期进行轻度水分调亏(田间持水量的 55% ~ 65%)可有效减少无效分枝, 抑制茎叶旺长, 植株能量消耗较少, 而块茎膨大期复水可促进作物细胞壁的合成, 地下块茎生长得到有效补偿, 这在相关文献中已得到证实<sup>[27~28]</sup>, 因此不会引起马铃薯产量下降。本研究还发现, 马铃薯块茎膨大期以块茎生长为主, 充足的水分可增加单株薯质量, 而水分亏缺程度过大(田间持水量的 45% ~ 55%)或历时过长将导致细胞壁变得坚固以致复水后不能恢复扩张, 从而引起产量显著下降(如 WD5)。已有研究表明, 淀粉积累期土壤湿度过大会引起薯块腐烂和种薯不耐储藏, 需适量的水分以保证植株绿叶面积寿命, 有利于有机物向块茎运输<sup>[26, 29]</sup>。因此, 块茎形成期和块茎膨大期是马铃薯需水关键期和需水高峰期<sup>[30]</sup>。

本研究发现, 马铃薯不同生育阶段耗水量由大到小为块茎形成期、块茎膨大期、幼苗期、淀粉积累期, 大致呈先增大、后减小、再减小的变化趋势, 与刘战东<sup>[26]</sup>、王俊国<sup>[29]</sup>等研究认为前期耗水小, 中期逐渐变大, 后期减小的近似抛物线这一结果不一致, 这可能是由于本试验气候条件及品种特性与以往研究不同有关。本研究中, 供试马铃薯为晚熟品种, 块茎膨大期正值该区 8 月下旬至 9 月上旬, 此时马铃薯受气温和光照变小的影响植株蒸腾量和棵间蒸发量减少, 耗水量也相应减小。各生育阶段耗水量受水分调亏影响较大, 水分调亏程度越大耗水量减少也越显著。

本研究认为, 块茎形成期土壤水分轻度调亏(田间持水量的 55% ~ 65%)不会降低膜下滴灌马铃薯产量, 而块茎形成期中度(田间持水量的 45% ~ 55%)、块茎膨大期轻度和中度水分调亏则显著降低产量。膜下滴灌水分调亏对马铃薯单株结薯数、单株薯质量均有显著影响, 但对薯块纵径、横径影响不显著, 块茎形成期水分调亏降低马铃薯单株结薯数。块茎形成期轻度调亏马铃薯水分利用效率最高, 比块茎膨大期中度调亏和淀粉积累期轻度调亏提高 36.2% 和 32.4%, 而块茎形成期中度调亏和

块茎膨大期轻度调亏则分别提高 31.9%、28.2% 和 30.9%、27.2%, 表明在块茎形成期进行水分调亏比块茎膨大期和淀粉积累期调亏更有利于马铃薯水分利用效率提高。所以, 马铃薯块茎形成期土壤相对含水率保持在 55% ~ 65% 可获得作物产量和水分利用效率同步提高, 块茎形成期保持在 45% ~ 55% 或块茎膨大期保持在 55% ~ 65% 可在一定程度上提高马铃薯水分利用效率但减产显著, 而块茎膨大期保持在 45% ~ 55% 则既显著降低马铃薯产量又显著降低水分利用效率。因此, 采用膜下滴灌在马铃薯块茎形成期进行轻度水分调亏灌溉可实现作物产量和水分利用效率同步提高的目的, 这对西北干旱内陆区农业高效节水具有重要的现实意义。

水分亏缺影响作物光合生理过程<sup>[31]</sup>, 可使作物净光合速率、蒸腾速率下降, 叶绿素含量减少。裴冬等<sup>[32]</sup>研究发现, 土壤水分调控使小麦光合速率下降且峰值提前出现, 这有助于亏缺处理的作物利用有限的土壤水分。孟兆江等<sup>[33]</sup>对夏玉米的研究表明, 水分亏缺后复水对作物光合速率具有超补偿效应, 对光合产物具有超补偿积累, 有利于光合产物运转和分配。王婷等<sup>[34]</sup>研究发现, 马铃薯叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及产量均随干旱胁迫程度增加而降低, 且不同品种对水分胁迫处理存在差异。本研究结果表明, 不同生育期水分调亏均可引起马铃薯叶片光合速率和蒸腾速率降低, 其降低程度取决于土壤水分亏缺程度, 且在复水后马铃薯叶片光合速率变化不大, 蒸腾速率和气孔导度则均有所增大。可见, 土壤含水率对作物生长、生理及产量都有影响, 其影响程度及作物对水分亏缺的响应与作物生育时期和水分亏缺程度有关。

## 4 结论

(1) 不同生育期水分调亏均可引起马铃薯叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低, 且降低程度取决于水分亏缺程度。在复水后叶片光合速率变化不大, 蒸腾速率和气孔导度则均有所增大。

(2) 块茎形成期轻度水分调亏不会降低马铃薯产量, 而块茎形成期中度调亏、块茎膨大期轻度和中度调亏则显著降低马铃薯产量。膜下滴灌调亏对马铃薯单株结薯数、单株薯质量均有显著影响, 但对薯块纵径、横径影响不显著。

(3) 马铃薯不同生育阶段耗水量由大到小为块茎形成期、块茎膨大期、幼苗期、淀粉积累期, 各生育阶段耗水量受水分调亏影响较大, 水分调亏程度越大耗水量减少越显著, 所有水分调亏马铃薯全生育期耗水量均显著低于充分供水, 且以块茎膨大期轻

度调亏的耗水量最少。

轻度调亏和充分供水分别提高 36.2%、32.4% 和 14.2%。

(4)块茎形成期轻度水分调亏马铃薯水分利用效率最高,比块茎膨大期中度水分调亏、淀粉积累期

### 参 考 文 献

- 1 FAO. Production yearbook[M]. Rome: FAO, 1995, 48: 243.
- 2 Schapendonk A H C M, Spitters C J T, Groot P J. Effects of water stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of five potato cultivars[J]. Potato Research, 1989, 32(1): 17~32.
- 3 van Loon C D. The effect of water stress in potato growth, development and yield[J]. American Journal of Potato Research, 1981, 58(1): 51~69.
- 4 Lynch D R, Foroud N, Kozub G C, et al. The effect of moisture stress at three growth stages on the yield, components of yield and processing quality of eight potato cultivars [J]. American Journal of Potato Research, 1995, 72(6): 375~386.
- 5 Eldredge E P, Holmes Z A, Mosly A R, et al. Effect of transitory water stress on potato tuber stem-end reducing sugar and fry color[J]. American Journal of Potato Research, 1996, 73(11): 517~530.
- 6 李剑萍, 耿秀华, 韩颖娟, 等. 宁夏马铃薯需水量的时空特征分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(26): 15 888~15 892, 15 914.  
Li Jianping, Geng Xiuhua, Han Yingjuan, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of the water requirements of potato (*Solanum tuberosum*) in Ningxia[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(26): 15 888~15 892, 15 914. (in Chinese)
- 7 王凤新, 康跃虎, 刘士平. 滴灌条件下马铃薯耗水规律和需水量的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 9~15.  
Wang Fengxin, Kang Yuehu, Liu Shiping. Patterns of water consumption and requirements of potato under dropping irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 9~15. (in Chinese)
- 8 李广, 侯扶江. 河西地区农业气候资源与植被的空间分布格局[J]. 草业学报, 2002, 11(3): 80~84.  
Li Guang, Hou Fujiang. The space distribution pattern of climate resources and corresponding vegetation in Hexi area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2002, 11(3): 80~84. (in Chinese)
- 9 杨会颖, 刘海军, 李艳, 等. 膜下滴灌条件下土壤基质势对辣椒产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 54~60.  
Yang Huiying, Liu Haijun, Li Yan, et al. Effects of soil matric potential on yield and water use efficiency of hot pepper under mulched drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 54~60. (in Chinese)
- 10 李昭楠, 李唯, 姜有虎, 等. 西北干旱区戈壁葡萄膜下滴灌需水量和灌溉制度[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 247~251.  
Li Zhaonan, Li Wei, Jiang Youhu, et al. Water demand and irrigation schedule of drip irrigation for Gobi grape under plastic mulch in northwest arid region of China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 247~251. (in Chinese)
- 11 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚, 等. 膜下滴灌棉花产量和品质与作物缺水指标的关系研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 26~29.  
Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, Yang Runya, et al. Relationships between yield, quality and CWSI of cotton under drip-irrigation with mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 26~29. (in Chinese)
- 12 刘战东, 肖俊夫, 刘祖贵, 等. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 60~64.  
Liu Zhandong, Xiao Junfu, Liu Zugui, et al. Effects of different irrigation treatment on morphological indexes, water consumption and yield of maize under mulch drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 60~64. (in Chinese)
- 13 王玉明, 张子义, 樊明寿. 马铃薯膜下滴灌节水及生产效率的初步研究[J]. 中国马铃薯, 2009, 23(3): 148~151.  
Wang Yuming, Zhang Ziyi, Fan Mingshou. Water use efficiency and water production efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) with under mulch drip irrigation[J]. Chinese Potato Journal, 2009, 23(3): 148~151. (in Chinese)
- 14 侯小艳, 王凤新, 韩江江, 等. 塑料覆盖对干旱地区马铃薯滴灌生育期的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 115~121.  
Hou Xiaoyan, Wang Fengxin, Han Jiangjiang, et al. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 115~121.
- 15 肖厚军, 孙锐锋, 何佳芳, 等. 不同水分条件对马铃薯耗水特性及产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(1): 73~75.  
Xiao Houjun, Sun Ruifeng, He Jiafang, et al. Effects of different water-supply on yield and water consumption characteristics of potato[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(1): 73~75. (in Chinese)
- 16 武朝宝, 任罡, 李金玉. 马铃薯需水量与灌溉制度试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 93~95.  
Wu Chaobao, Ren Gang, Li Jinyu. Experimental study on water requirements and irrigation schedule of potato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(3): 93~95. (in Chinese)
- 17 康跃虎, 王凤新, 刘士平, 等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 66~72.  
Kang Yuehu, Wang Fengxin, Liu Shiping, et al. Effects of water regulation under drip irrigation on potato growth [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 66~72. (in Chinese)
- 18 韩占江, 于振文, 王东, 等. 调亏灌溉对冬小麦耗水特征和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2 671~2 677.  
Han Zhanjiang, Yu Zhenwen, Wang Dong, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption characteristics and

- water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2 671 ~ 2 677. (in Chinese)
- 19 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要农作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- 20 Ledoigt G, Griffaut B, Debiton E, et al. Analysis of secreted protease inhibitors after water stress in potato tubers[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2006, 38: 268 ~ 271.
- 21 Lynch D R, Foroud N, Kozub C C, et al. The effect of moisture stress at three growth stage on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties[J]. American Journal of Potato Research, 1995, 72(6): 375 ~ 385.
- 22 Steyn J M, Plessis H F, Fourie P, et al. Yield response of potato genotypes to different soil water regimes in contrasting seasons of a subtropical climate[J]. Potato Research, 1998, 41(3): 239 ~ 245.
- 23 Luisa Costa, Vedove G, Gianquinto G, et al. Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress[J]. Potato Research, 1997, 40(1): 19 ~ 34.
- 24 Ali Eskandari, Hamid Reza Khazaie, Ahmad Nezami, et al. Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59(6): 889 ~ 897.
- 25 Radmila Stikic, Zorica Jovanovic, Milena Paukovic, et al. Deficit irrigation techniques in potato growing: practical application of stress physiology knowledge[C]//45th Croatian & 5th International Symposium on Agriculture, 1992: 639 ~ 642.
- 26 刘战东, 肖俊夫, 于秀琴. 不同土壤水分处理对马铃薯形态指标、耗水量及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010(8): 1 ~ 3, 7.  
Liu Zhandong, Xiao Junfu, Yu Xiuqin. Effects of different soil moisture treatments on morphological index, water consumption and yield of potatoes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(8): 1 ~ 3, 7. (in Chinese)
- 27 Clinton C Shock, James C Zalewski, Timothy D Stieber, et al. Impact of early-season water deficit on russet Burbank plant development, tuber yield and quality[J]. American Journal of Potato Research, 1992, 69(12): 793 ~ 803.
- 28 Shock C C, Feibert E B G, Sanuders L D. Potato yield and quality response to deficit irrigation[J]. Hort Sciences, 1998, 33(4): 655 ~ 659.
- 29 王俊国. 建薯 1 号马铃薯生育期适宜土壤水分指标研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18 119 ~ 18 120, 18 154.  
Wang Junguo. Potato suitable maturity indicator of soil moisture Jianshu 1[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(32): 18 119 ~ 18 120, 18 154. (in Chinese)
- 30 Fabeiro C, Martin de Santa Olalla F, Juan J A. Yield and size of deficit irrigated potatoes[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48(3): 255 ~ 266.
- 31 李合生, 孟庆伟, 夏凯, 等. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 32 裴冬, 孙振山, 陈四龙, 等. 水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 68 ~ 72.  
Pei Dong, Sun Zhenshan, Chen Silong, et al. Effects of water stress on physiological and agronomic features of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 68 ~ 72. (in Chinese)
- 33 孟兆江, 刘安能, 庞鸿宾, 等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 88 ~ 92.  
Meng Zhaojiang, Liu Anneng, Pang Hongbin, et al. Study on physiological mechanism and indices of regulated deficit irrigation in summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 88 ~ 92. (in Chinese)
- 34 王婷, 海梅荣, 罗海琴, 等. 水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(5): 737 ~ 742.  
Wang Ting, Hai Meirong, Luo Haiqin, et al. Effect of water stress on leaf photosynthetic characteristics and yield of potato[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, 25(5): 737 ~ 742. (in Chinese)
- 35 李毅, 任鑫, 司炳成. 覆膜开孔条件下层状土壤蒸发的水热运移[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 738 ~ 744.  
Li Yi, Ren Xin, Si Bingcheng. Movement in layered soils during evaporation under perforated plastic mulch[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(6): 738 ~ 744. (in Chinese)

(上接第 158 页)

- 19 Cochard H, Rodolphe M, Patrick G, et al. Temperature effects on hydraulic conductance and water relations of *Quercus robur* L. [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(348): 1 255 ~ 1 259.
- 20 Granier A, Loustau D. Measuring and modeling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 71(1 ~ 2): 61 ~ 81.
- 21 Irvine J, Perks M P, Magnani F, et al. The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance [J]. Tree Physiology, 1998, 18(6): 393 ~ 402.
- 22 Teskey R O, Sheriff D W. Water use by *Pinus radiata* trees in a plantation [J]. Tree Physiology, 1996, 16(1 ~ 2): 273 ~ 279.
- 23 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 等. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 895 ~ 905.  
Xu Xianying, Sun Baoping, Ding Guodong, et al. Sap flow patterns of three main sand-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 895 ~ 905. (in Chinese)
- 24 Germak J, Hzulak J, Penka M. Water potential and sap flow rate in adult trees with moist and dry soil as used for the assessment of root system depth[J]. Biologia Plantarum, 1980, 22(1): 34 ~ 41.